



中国细长蚁属 *Tetraponera* 物种的分布格局 与生态位分化

冷雪艳，张银川，徐正会*，吴宁宁，史彩云，杨泽俊

(西南林业大学林学院，云南省森林灾害预警与控制重点实验室，昆明 650224)

摘要：为了揭示中国细长蚁属 *Tetraponera* 物种的生态位分化，依据过去 30 年里积累的我国细长蚁属物种的标本、生态和地理分布数据，研究了该属物种的区系和分布格局，合计发现中国细长蚁属物种 13 个。该属物种在全球动物地理区划中具有典型东洋界特征，在中国动物地理区划中具有典型华南区特征。分布格局研究显示，云南省细长蚁属的物种最丰富，飘细长蚁 *T. allaborans* (Walker, 1859) 是生态适应幅度和生态位最宽的物种，而显赫细长蚁 *T. notabilis* Ward, 2001 是生态适应幅度和生态位最窄的物种；常绿阔叶林和季节性雨林中栖息的物种最丰富；该属物种主要在植物上和地表觅食。依据区系和分布格局研究结果进一步探讨了物种的生态位分化现象，发现中国细长蚁属物种在全球和中国动物地理中、在水平和垂直维度上、在栖息生境的选择上、在觅食行为方面均表现出生态位的明显分化。生态位宽度研究表明，平静细长蚁 *T. modesta* (Smith, 1860) 的生态位最宽，显赫细长蚁和尖唇细长蚁 *T. protensa* Xu & Chai, 2004 生态位最窄。11 类生境中各物种的生态位宽度均偏大，表明细长蚁属物种在 11 类生境中群落较为稳定，适应能力较强。利用 MaxEnt 模型模拟物种在当前气候条件下的潜在分布范围，预测了细长蚁属在中国的适生区域。结论认为中国细长蚁属物种生态位分化明显，地貌、气候、植被的多样化和地理隔离为该属物种的生态位分化提供了良好生态和地理条件。研究结果为我国细长蚁属物种的保护和利用提供了科学依据。

关键词：蚁科；区系；生物地理；生境；觅食场所；筑巢场所

中图分类号：Q968.1；

文献标识码：A

Distribution patterns and niche differentiation of the *Tetraponera* species in China

LENG Xue-Yan, ZHANG Yin-Chuan, XU Zheng-Hui*, WU Ning-Ning, SHI Cai-Yun, YANG Ze-Jun (Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province, College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: To reveal the niche differentiation of the *Tetraponera* species in China, the fauna and distribution patterns of species of the genus were studied based on the specimens and data of ecology and geographical distribution of *Tetraponera* species accumulated in the past 30 years in

基金项目：国家自然科学基金委员会应急管理项目子课题（31750002）；国家自然科学基金（31860615）

作者简介：冷雪艳，女，硕士研究生，研究方向为资源利用与植物保护，E-mail: lengxueyan1998@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 徐正会，男，博士，教授，研究方向为森林昆虫学、蚁类学，E-mail: xuzhenghui1962@163.com

收稿日期 Received: 2024-10-18; 修回日期 Revision received: 2024-12-12; 接受日期 Accepted: 2024-12-14

our country. A total of 13 species of the genus were found in China. The species of the genus has a typical character of Oriental Region in the world zoogeographical division and possesses a typical character of South China Zone in the Chinese zoogeographical division. It was revealed by the study of distribution patterns that species of the genus were most abundant in Yunnan Province. In addition, *T. allaborans* (Walker, 1859) had the widest ecological adaptation range and niche. Meanwhile, *T. notabilis* Ward, 2001 had the narrowest ecological adaptation range and niche. Species of the genus were most abundant in evergreen broadleaf forest and seasonal rainforest, which mainly foraged on plants and on the surface of the ground. The niche differentiation of species was further probed based on the results of faunal and distribution patterns, and it was found that all the species of the genus in China showed obvious niche differentiation in global and Chinese zoogeography, in the horizontal and vertical dimensions, in habitat selection, and in foraging behavior. The research on niche width showed that *T. modesta* (Smith, 1860) had the widest ecological niche, and *T. notabilis* Ward, 2001 and *T. protensa* Xu & Chai, 2004 had the narrowest ecological niche. The niche width of species in the 11 habitat types was generally large, and it showed that the community of *Tetraponera* species was relatively stable and had strong adaptability in the 11 habitat types. The suitable area for *Tetraponera* in China was predicted by using the MaxEnt model to simulate the potential distribution range of species under current climate conditions. The conclusion is that the niche differentiation of the *Tetraponera* species in China is obvious, the diverse landscape, climate, vegetation and geographical isolation having provided a good ecological and geographical condition for niche differentiation of the species of the genus. The results have provided a scientific basis for the protection and utilization of the *Tetraponera* species in our country.

Key words: Formicidae; fauna; biogeography; habitat; forage place; nesting site

生态位包括空间生态位、功能生态位和多维超体积生态位（张光明和谢寿昌，1997）。探讨空间生态位的宽度和重叠现象，有助于揭示亲缘关系相近的物种在利用环境资源方面的分化现象，对认识不同物种的地位及其保护与利用具有重要参考价值。蚂蚁是种类和数量最多的社会性昆虫。它们分布广泛，个体密度大，对分解土壤中动植物残体、改善土壤理化性质、促进植物种子传播、控制害虫猖獗等方面作用显著（Hölldobler and Wilson, 1990），具有重要的生态环境保护和经济价值（蒋富国等，2023）。细长蚁属 *Tetraponera* 由 Smith（1852）建立，隶属于昆虫纲 Insecta 膜翅目 Hymenoptera 蚁科 Formicidae 伪切叶蚁亚科 Pseudomyrmecinae，分布于旧大陆的热带和亚热带地区（<https://antmaps.org>），目前全球已记录 87 种（<http://www.antcat.org>），是一类树栖型为主的肉食性昆虫，在自然环境中具有生物防治利用价值。Wheeler（1930）首次记录中国细长蚁属 3 个种。此后，吴坚和王常禄（1990）记录中国细长蚁属 5 个种，其中发现 1 个新种和 1 个新纪录种。吴坚和王常禄（1995）记录中国细长蚁属 4 个种。唐觉等（1995）记录中国细长蚁属 1 个种。周善义（2001）记录中国广西壮族自治区细长蚁属 5 个种。徐正会（2002）记录中国云南省西双版纳自然保护区细长蚁属 6 个种。王维等（2009）记录中国湖北省细长蚁属 3 个。Xu and Chai (2004)记录中

国细长蚁属 13 种，其中发现 5 个新种。马丽滨等（2022）记录云南省细长蚁属 4 个种。徐正会等（2022）记录云南高黎贡山细长蚁属 4 个种。以上研究为中国细长蚁属物种分布格局研究打下了坚实基础。

为了揭示中国细长蚁属物种的分布格局和生态位分化现象，依据西南林业大学蚂蚁研究团队过去 30 年里通过野外调查获得的我国细长蚁属的标本、栖息生境、觅食场所、筑巢场所和地理分布数据，研究了该属物种的区系和分布格局，并依据区系和分布格局研究结果进一步探讨了物种的生态位分化，以期为我国细长蚁属昆虫的保护和利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

依据西南林业大学蚂蚁研究团队过去 30 年里通过野外调查，采用样地调查法（徐正会等，1999）和搜索调查法（徐正会等，2011）获得的我国细长蚁属的标本、栖息生境、觅食场所、筑巢场所和地理分布数据开展分类、区系分析和分布格局研究。

1.2 分类方法

采用形态分类方法，依据国内外蚂蚁分类文献（Hölldobler and Wilson, 1990；吴坚和王常禄，1990；唐觉等，1995；吴坚和王常禄，1995；周善义，2001；徐正会，2002；Xu and Chai, 2004）以及全球蚂蚁研究网络数据库的分类目录（<http://www.antcat.org>）、检索表（<https://www.antwiki.org>）和模式标本高清照片（<https://www.antweb.org>）对细长蚁属标本进行分类鉴定。

1.3 区系分析法

根据全球蚂蚁地理分布网络数据库（<https://antmaps.org>）和有关分类学文献（唐觉等，1995；吴坚和王常禄，1995；周善义，2001；徐正会，2002；Xu and Chai, 2004），查询中国细长蚁属各个物种的地理分布信息。再依据全球陆地动物地理区划方案（Wallace, 1879）和中国动物地理区划方案（张荣祖，2011）进行区系分析。

1.4 分布格局分析法

采用采获频数法（徐正会等，2011）分析细长蚁属的分布格局，包括水平分布、垂直分布、栖息生境、觅食和筑巢场所的分析。采获蚂蚁的植被类型视为栖息生境。发现蚁巢的采集场所记录为筑巢场所，未发现蚁巢的采集场所记录为觅食场所。蚂蚁物种的生态适应幅度依据物种的垂直分布高差划分： < 500 m，狭窄； $500\sim 999$ m，较窄； $1\ 000\sim 1\ 499$ m，中等； $1\ 500\sim 1\ 999$ m，较宽； $\geq 2\ 000$ m，宽阔（于娜娜等，2011）。

1.5 地理分布数据的获取

通过野外调查获得中国细长蚁属地理分布点 162 个。在此数据基础上访问全球生物多样性信息平台（<https://www.gbif.org>）获取细长蚁属地理分布点 72 个。为避免由于物种分布点聚集导致的模型过度拟合，利用 ENM Tools 1.4.4 软件筛选分布点数据，筛选剔除不确定和重复样点后，最后得到用于模拟中国细长蚁属地理分布点的数据为 194 个。

1.6 环境变量的获取

从世界气候数据库 (<https://www.worldclim.org>) 中获取 1970-2000 年环境数据中的气候变量。植被类型空间分布变量通过国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>) 中国 1 : 100 万植被数据集中获取。在 ArcGIS 10.2 中提取环境因子数值并使用 ENM Tools 1.4.4 软件进行“Pearson”相关性分析, 将环境变量 $|r| > 0.8$ 定义为高度相关。使用 MaxEnt 3.4.4 建立初始模型, 得到 19 个环境因子的贡献率, 去除贡献率为 0 的环境因子。结合物种生态学特性, 从高度相关的环境变量中筛选贡献率最高的环境因子, 最终保留 6 个环境因子用于后续建模。

1.7 MaxEnt 模型

MaxEnt 模型具有较强的适生性分析功能, 因此本研究使用 MaxEnt 模型对物种的潜在分布区进行预测。将细长蚁属物种分布点和 6 个环境数据导入 MaxEnt 3.4.4, 在运算过程中, 随机测试百分比为 25%, 设置 10 次重复, 迭代次数为 10 000, 勾选制作响应曲线、刀切法检验环境变量和随机种子选项, 选择输出格式为 Logistic, 输出文件类型为 *.asc, 重复运行类型为自举法 (Bootstrap), 其余参数为默认值。采用受试者工作特征曲线 (ROC) 法以评估模型精度, ROC 曲线下的面积为 AUC 值, AUC 值越大结果越准确。

1.8 生态位宽度计算

利用 Levins 提出的生态位宽度的计算公式, 计算各资源状态中某物种分布的均匀度来评估该物种的生态位宽度。

$$B_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2}$$

式中 B_i 为种 i 的生态位宽度, j 表示不同维度的资源等级, P_{ij} 代表物种 i 对不同资源等级 j 的利用占各自所利用资源总量的比例。

以上所有数据处理在 Excel 2019 和 R.4.0.3 中进行, 生态位及种间关联主要运用 R 软件的“spaa”以及“psych”程序包计算。

1.9 地图资源

中国标准地图来源于自然资源部标准地图服务系统 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>), 比例为 1 : 1 000 万, 审图号是 GS (2023) 2762 号。

2 结果与分析

2.1 物种鉴定

经分类鉴定, 合计发现中国细长蚁属物种 13 个: 红黑细长蚁 *Tetraponera rufonigra* (Jerdon, 1851)、凹唇细长蚁 *T. concava* Xu & Chai, 2004、宾氏细长蚁 *T. binghami* (Forel, 1902)、狭唇细长蚁 *T. attenuata* Smith, 1877、显赫细长蚁 *T. notabilis* Ward, 2001、光亮细长蚁 *T. nitida* (Smith, 1860)、隆背细长蚁 *T. convexa* Xu & Chai, 2004、榕细长蚁 *T. microcarpa*

Wu & Wang, 1990、叉唇细长蚁 *T. furcata* Xu & Chai, 2004、尖唇细长蚁 *T. protensa* Xu & Chai, 2004、瓢细长蚁 *T. allaborans* (Walker, 1859)、无缘细长蚁 *T. amargina* Xu & Chai, 2004、平静细长蚁 *T. modesta* (Smith, 1860)。此前记录于我国的 4 个种：黑细长蚁 *T. nigra* (Jerdon, 1851) (吴坚和王常禄, 1990, 1995; 徐正会, 2002) 和艾特肯细长蚁 *T. aitkenii* (Forel, 1902) (徐正会, 2002) 属于鉴定错误, 应从中国的区系中移除; 缅甸细长蚁 *T. birmana* (Forel, 1902) (徐正会, 2002) 已经被修订为狭唇细长蚁 *T. attenuata* Smith, 1877 的次异名 (Ward, 2001), 西格细长蚁 *T. siggi* (Forel, 1902) (徐正会, 2002) 已经被修订为光亮细长蚁 *T. nitida* (Smith, 1860) 的次异名 (Ward, 2001)。

2.2 区系分析

中国细长蚁属已知 13 种蚂蚁在世界动物地理界中, 东洋界分布种有 13 个 (占 100%), 澳洲界分布种有 3 个 (占 23.1%), 非洲界分布种 1 个 (占 7.7%), 古北界、新北界和新热带界均无分布 (表 1)。可见中国的细长蚁属物种具有典型东洋界特征, 与澳洲界关系较紧密, 与非洲界关系疏远。在中国动物地理区中, 华南区分布种有 13 个 (占 100%), 华中区分布种有 6 个 (占 46.2%), 西南区分布种有 3 个 (占 23.1%), 华北区、青藏区、蒙新区和东北区均无分布 (表 1)。中国的细长蚁属物种具有典型华南区特征, 与华中区关系紧密, 与西南区关系较疏远。在 13 个物种之中, 瓢细长蚁分布于 2 个界、3 个区, 是分布范围最宽的物种; 平静细长蚁分布于 2 个界、2 个区, 分布范围较宽; 光亮细长蚁和红黑细长蚁分布于 2 个界、1 个区, 分布范围第三; 凹唇细长蚁、叉唇细长蚁、狭唇细长蚁、榕细长蚁、隆背细长蚁、无缘细长蚁这 6 个种分布于 1 个界、2 个区, 分布范围第四; 宾氏细长蚁、显赫细长蚁、尖唇细长蚁这 3 个种近分布于 1 界、1 区, 分布范围最窄。

表 1 中国细长蚁属物种在世界动物地理界和中国动物地理区的分布

Table 1 Distribution of *Tetraponera* species in world zoogeographical regions and Chinese zoogeographical

物种名称 Species names	zones												
	世界动物地理界 World zoogeographical regions						中国动物地理区 Chinese zoogeographical zones						
	A	B	C	D	E	F	a	b	c	d	e	f	g
瓢细长蚁 <i>T. allaborans</i>	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
平静细长蚁 <i>T. modesta</i>	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
光亮细长蚁 <i>T. nitida</i>	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
红黑细长蚁 <i>T. rufonigra</i>	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
凹唇细长蚁 <i>T. concava</i>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
叉唇细长蚁 <i>T. furcata</i>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
狭唇细长蚁 <i>T. attenuata</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
榕细长蚁 <i>T. microcarpa</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
隆背细长蚁 <i>T. convexa</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
无缘细长蚁 <i>T. amargina</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
宾氏细长蚁 <i>T. binghami</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
显赫细长蚁 <i>T. notabilis</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
尖唇细长蚁 <i>T. protensa</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

合计 Total	13	0	3	1	0	0	13	3	6	0	0	0	0
物种所占百分比 (%) Percentage	100	0	23.1	7.7	0	0	100	23.1	46.2	0	0	0	0

注：A, 东洋界; B, 古北界; C, 澳洲界; D, 非洲界; E, 新北界; F, 新热带界; a, 华南区; b, 西南区; c, 华中区; d, 华北区; e, 青藏区; f, 蒙新区; g, 东北区。表中, 1 表示有分布; 0 表示没有分布。Note: A, Oriental Region; B, Palearctic Region; C, Australasian Region; D, Afrotropical Region; E, Nearctic Region; F, Neotropical Region; a, South China Zone; b, Southwest China Zone; c, Central China Zone; d, North China Zone; e, Qinghai-Tibet Zone; f, Xinjiang-Inner Mongolia Zone; g, Northeast China Zone. In the table, 1 meant present; 0 meant absent.

2.3 分布格局分析

2.3.1 中国各省区间细长蚁属物种数量对比

中国细长蚁属已知 13 个种分布于全国 12 个省份 (图 1), 其中分布于云南省的物种最多 (12 种), 占全部物种的 92.3%; 广西壮族自治区分布 7 种 (占 53.8%), 位列第二; 之后物种丰富度依次是海南、广东、香港、湖南、湖北、浙江、台湾、西藏、四川和福建; 江西省的物种最少 (1 种), 占 7.7%。海南岛已知 6 种, 香港特别行政区已知 5 种, 台湾省已知 3 种。在 13 个已知种之中, 飘细长蚁分布于 12 个省份, 是分布范围最广的物种; 之后物种的分布范围宽度顺序依次是平静细长蚁、狭唇细长蚁、榕细长蚁、宾氏细长蚁、光亮细长蚁、红黑细长蚁、叉唇细长蚁、无缘细长蚁、凹唇细长蚁、隆背细长蚁; 隆背细长蚁和显赫细长蚁仅云南省, 是分布范围最窄的物种。从采获频次来看, 飘细长蚁是采获频次最高的物种 (合计 186 次), 也是国内最常见的物种; 其次是狭唇细长蚁, 合计采获 137 次; 第三是叉唇细长蚁, 合计采获 78 次; 显赫细长蚁仅在云南采获 1 次, 是已知物种之中最稀有的物种。

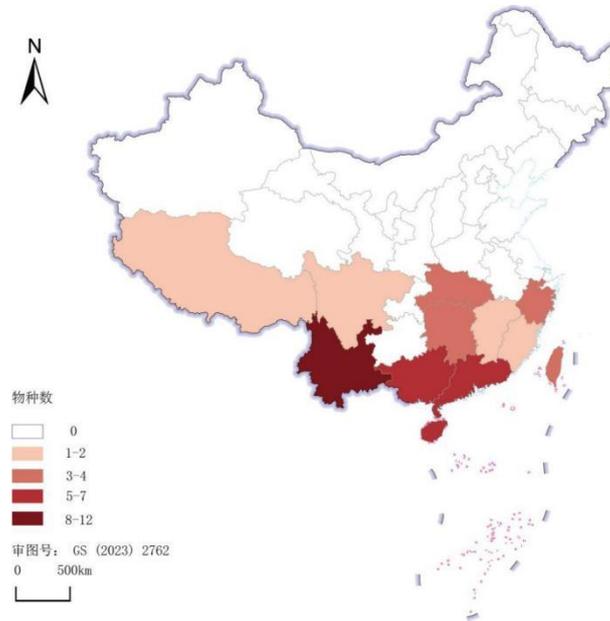


图 1 细长蚁属物种在中国的分布

Fig. 1 Distribution of *Tetraponera* species in China

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2023) 2762 号的标准地图制作, 底图无修改, 下同。
Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2023) 2762 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified. The same below.

2.3.2 垂直分布

中国细长蚁属物种垂直分布海拔高差较大、生态适应幅度较宽的物种依次是狭唇细长蚁、飘细长蚁和叉唇细长蚁；垂直分布垂直高差中等、生态适应幅度中等的物种是红黑细长蚁；垂直分布高差较窄、生态适应幅度较窄的物种有榕细长蚁、尖唇细长蚁等 5 种；垂直分布高差狭窄、生态适应幅度狭窄的物种有宾氏细长蚁、隆背细长蚁和显赫细长蚁，其中显赫细长蚁仅在 770 m 的海拔高度上捕获。飘细长蚁的垂直分布海拔最高，达到 2 000 m；光亮细长蚁的垂直分布海拔最低，只有 43 m（表 2）。因缺乏平静细长蚁的垂直分布数据，在此未做分析。

2.3.3 栖息生境

中国细长蚁属物种的栖息生境有 11 类，其中常绿阔叶林和季节性雨林的物种最丰富，各有 9 种；之后物种从多到少顺序依次是山地雨林、针叶林、针阔混交林、热性人工林、落叶阔叶林、季雨林；干热河谷稀树灌丛、竹林、草丛这 3 类生境的物种最少，各有 3 种；在所有物种之中，狭唇细长蚁和飘细长蚁适应性最强，均可栖息于 11 类生境中；之后栖息生境类型从多到少顺序依次为叉唇细长蚁、无缘细长蚁、红黑细长蚁；榕细长蚁、尖唇细长蚁和凹唇细长蚁栖息于 3 类生境中；光亮细长蚁、宾氏细长蚁和隆背细长蚁栖息于 2 类生境中；显赫细长蚁仅栖息于季节性雨林中（表 2）。

表 2 中国细长蚁属物种的栖息生境和垂直分布

Table 2 Habitats and vertical distribution of *Tetraponera* species from China

物种名称 Species names	各类生境中的捕获频数											生境 合计 HA	海拔范围 (m) AR	海拔高 差 (m) AD	生态适 应幅度 EDR
	Collected frequency in different habitats														
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI				
狭唇细长蚁 <i>T. attenuata</i>	14	25	7	6	10	25	2	35	1	3	3	11	85~1 750	1 665	较宽 RW
飘细长蚁 <i>T. allaborans</i>	58	15	10	17	22	10	1	30	10	2	1	11	340~2 000	1 660	较宽 RW
叉唇细长蚁 <i>T. furcata</i>	27	6	10	2	17	1	4	7	4	0	0	9	460~2 017	1 557	较宽 RW
红黑细长蚁 <i>T. rufonigra</i>	3	3	1	0	4	3	0	0	0	0	1	6	220~1 350	1 130	中等 M
榕细长蚁 <i>T. microcarpa</i>	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	3	220~1 210	990	较窄 RN
尖唇细长蚁 <i>T. protensa</i>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	740~1 480	740	较窄 RN
凹唇细长蚁 <i>T. concava</i>	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	3	900~1 600	700	较窄 RN
光亮细长蚁 <i>T. nitida</i>	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	43~675	632	较窄 RN
无缘细长蚁 <i>T. amargina</i>	5	1	2	2	0	0	1	8	0	2	0	7	850~1 400	550	较窄 RN
宾氏细长蚁 <i>T. binghami</i>	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	460~700	240	狭窄 N

隆背细长蚁 <i>T. convexa</i>	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1 120~1 270	150	狭窄 N
显赫细长蚁 <i>T. notabilis</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	770	0	狭窄 N
合计 Total	9	9	8	6	5	5	5	4	3	3	3	—	—	—	—

注: I, 常绿阔叶林; II, 季节性雨林; III, 山地雨林; IV, 针叶林; V, 针阔混交林; VI, 热性人工林; VII, 落叶阔叶林; VIII, 季雨林; IX, 干热河谷稀树灌丛; X, 竹林; XI, 草丛; HA, 生境合计; AR, 海拔范围 (m); AD, 海拔高差 (m); EDR, 生态适应幅度; RW, 较宽; M, 中等; RN, 较窄; N, 狭窄。生态适应幅度按照物种垂直分布海拔高差划分: < 500 m, 狭窄; 500~999 m, 较窄; 1 000~1 499 m, 中等; 1 500~1 999 m, 较宽; ≥ 2 000 m, 宽阔。Notes: I, Evergreen broadleaf forest; II, Seasonal rainforest; III, Mountain rainforest; IV, Conifer forest; V, Conifer-broadleaf mixed forest; VI, Warm artificial forest; VII, Deciduous broadleaf forest; VIII, Monsoon forest; IX, Dry-hot valley savanna shrub; X, Bamboo forest; XI, Grass land; HA, Habitat amount; AR, Altitude range (m); AD, Altitude difference (m); EDR, Ecological adaptation range; RW, Relatively wider; M, Medium; RN, Relatively narrower; N, Narrow. The ecological adaptation range was divided according to the altitude difference in vertical distribution of species: < 500 m, narrow; 500~999 m, relatively narrower; 1 000~1 499 m, medium; 1 500~1 999 m, relatively wider; ≥ 2 000 m, wide.

2.3.4 觅食场所

中国细长蚁属物种在植物上和地表觅食的物种最丰富, 均为 10 种; 在土壤内觅食的物种有 4 种; 在朽木内觅食的物种只有 1 种。狭唇细长蚁的觅食场所最多, 有 4 类; 瓢细长蚁、叉唇细长蚁和尖唇细长蚁的觅食场所均为 3 类; 红黑细长蚁等 4 个种的觅食场所均为 2 类; 榕细长蚁等 4 个种的觅食场所只有 1 类。从捕获频数看, 狭唇细长蚁、叉唇细长蚁、无缘细长蚁等 6 个种主要在植物上觅食, 而瓢细长蚁和宾氏细长蚁主要在地表觅食; 尖唇细长蚁、红黑细长蚁、凹唇细长蚁在植物上和地表觅食的机会大体均等 (表 3)。

2.3.5 筑巢场所

中国细长蚁属物种在树洞内筑巢的物种最多, 发现 4 种; 在朽木内和地表筑巢的物种各发现 1 种; 大多数物种的筑巢场所尚不清楚, 有待进行更多研究。在发现筑巢场所的 4 个种之中, 瓢细长蚁的筑巢场所最丰富, 可以在树洞内、朽木内和地表筑巢; 狭唇细长蚁、红黑细长蚁和榕细长蚁均在树洞内筑巢 (表 3)。

表 3 中国细长蚁属物种的觅食和筑巢场所

Table 3 Forage and nesting sites of *Tetraponera* species from China

物种名称 Species names	各类觅食场所捕获频数 Collected frequency in different forage places				觅食场所合计 FLA	各类筑巢场所捕获频数 Collected frequency in different nesting sites			筑巢场所合计 NSA
	A	B	C	D		a	b	c	
	狭唇细长蚁 <i>T. attenuata</i>	85	38	5	1	4	2	0	0
瓢细长蚁 <i>T. allaborans</i>	21	51	12	0	3	1	1	1	3
叉唇细长蚁 <i>T. furcata</i>	57	16	5	0	3	0	0	0	0
尖唇细长蚁 <i>T. protensa</i>	1	1	1	0	3	0	0	0	0
红黑细长蚁 <i>T. rufonigra</i>	6	7	0	0	2	2	0	0	1
凹唇细长蚁 <i>T. concava</i>	2	2	0	0	2	0	0	0	0
光亮细长蚁 <i>T. nitida</i>	3	1	0	0	2	0	0	0	0
无缘细长蚁 <i>T. amargina</i>	15	6	0	0	2	0	0	0	0
榕细长蚁 <i>T. microcarpa</i>	4	0	0	0	1	1	0	0	1
宾氏细长蚁 <i>T. binghami</i>	0	3	0	0	1	0	0	0	0
隆背细长蚁 <i>T. convexa</i>	2	0	0	0	1	0	0	0	0

显赫细长蚁 <i>T. notabilis</i>	0	1	0	0	1	0	0	0	0
合计 Total	10	10	4	1	—	4	1	1	—

注：A, 植物上; B, 地表; C, 土壤内; D, 朽木内; a, 树洞内; b, 朽木内; c, 地表。Note: A, On the plant; B, On the ground; C, In soil; D, Inside dead wood; a, Inside tree hole; b, Inside dead wood; c, On the ground. FLA, Forage place amount; NSA, Nesting site amount.

2.4 细长蚁属物种的生态位宽度

利用细长蚁属采获频数分别计算了水平、垂直分布范围的生态位宽度，结果见表 4。水平分布范围下生态位宽度变化范围在 1~6 之间。平静细长蚁 *T. modesta* (Smith, 1860) 是生态位最宽的物种，而显赫细长蚁和尖唇细长蚁 *T. protensa* Xu & Chai, 2004 是生态位最窄的物种。在 11 类栖息生境下，细长蚁属物种生态位宽度变化范围在 1.5~6.0 之间（表 4）。狭唇细长蚁 *T. attenuata* Smith, 1887 生态位宽度最大，显赫细长蚁生态位宽度最小。各物种的生态位宽度从大到小顺序为：狭唇细长蚁、瓢细长蚁、红黑细长蚁、叉唇细长蚁、无缘细长蚁、尖唇细长蚁、榕细长蚁、凹唇细长蚁、隆背细长蚁、宾氏细长蚁、光亮细长蚁。总体上看，细长蚁属物种在各省区的生态位宽度都偏小，表明细长蚁属物种在省区的群落较不稳定，适应能力较差；在 11 类栖息生境下的生态位宽度都偏大，表明细长蚁属物种在各类栖息生境中的群落较为稳定，适应能力较强。

表 4 中国细长蚁属物种在水平和垂直范围内的生态位宽度

Table 4 Niche width indices of *Tetraponera* species from China in both vertical and horizontal range

物种名称 Species names	不同分布范围物种的生态位宽度 Bi	
	Niche width (Bi) of species with different distribution ranges	
	水平范围 Vertical range	垂直范围 Horizontal range
狭唇细长蚁 <i>T. attenuata</i>	1.08	5.96
瓢细长蚁 <i>T. allaborans</i>	1.21	5.56
叉唇细长蚁 <i>T. furcata</i>	1.03	4.91
红黑细长蚁 <i>T. rufonigra</i>	1.29	5.00
榕细长蚁 <i>T. microcarpa</i>	5.56	2.78
尖唇细长蚁 <i>T. protensa</i>	1.00	3.00
凹唇细长蚁 <i>T. concava</i>	1.60	2.67
光亮细长蚁 <i>T. nitida</i>	3.57	1.60
无缘细长蚁 <i>T. amargina</i>	1.10	4.28
宾氏细长蚁 <i>T. binghami</i>	3.77	1.80
隆背细长蚁 <i>T. convexa</i>	1.80	2.00
显赫细长蚁 <i>T. notabilis</i>	1.00	1.00
平静细长蚁 <i>T. modesta</i>	6.00	—

2.5 细长蚁属在中国的潜在空间分布格局

MaxEnt 3.4.4 软件重复运行 10 次输出的 ROC 曲线的平均 AUC 值均在 0.9 以上，说明 MaxEnt 模型的预测精度较好。将 MaxEnt 3.4.4 软件的输出结果导入 ArcGIS 10.2 中进行重分类处理，最终得到细长蚁属在我国的适生区分布区。从细长蚁属在我国的适生区分布图可以直观看出，以秦岭——淮河以北各省区市均为非适生区；低适生区主要呈块状分布于云南、广西、广东 3 省区的东北部地区及台湾省，在四川、湖北、安徽、江西、浙江这 5 个省分布较为分散；中适生区主要呈带状分布于云南中部、广西西南部、广东南部及台湾省局部地区；

高适生区主要集中于海南大部、广东西南部及西藏东南部，云南中部及广西西南部也有少量分布；极适生区集中分布在云南西南部和南部（图2）。

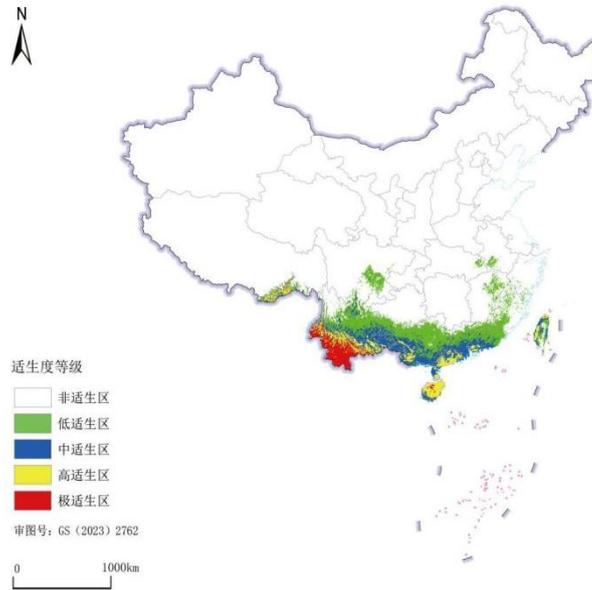


图2 细长蚁属在我国的适生分布区

Fig. 2 Suitable distribution regions of *Tetraponera* in China

3 结论与讨论

3.1 讨论

地理隔离是物种形成的基本机制（Darwin, 1859），大陆漂移引起地球陆地的分裂（Wegener, 2006），从而导致不同大陆的动动物种独立演化（Wallace, 1879）。同一演化分支的物种与起源种气候生态位越近其物种多样性越高（王芳等, 2018; Anoop *et al.*, 2020）。伪切叶蚁亚科 *Pseudomyrmecinae* 的物种也不例外，该亚科中的伪切叶蚁属 *Pseudomyrmex* Lund, 1831 局限于新大陆的新北界南部和新热带界分化发展，美细长蚁属 *Myrcidris* Ward, 1990 局限于新热带界中部，而细长蚁属则在旧大陆的东洋界、澳洲界和非洲界演化分化（<https://antmaps.org>; Ward, 2001）。中国的细长蚁属物种主要在东洋界发展分化，具有典型东洋界特征，在 13 个已知种之中，只有飘细长蚁、平静细长蚁、光亮细长蚁这 3 个种与澳洲界共有，与非洲界塞舌尔共有的红黑细长蚁属于入侵传入，其余 9 个种均为东洋界特有种。在这 9 个特有种之中，华南区和西南区共有种 2 个（凹唇细长蚁和叉唇细长蚁），华南区和华中区共有种 4 个（狭唇细长蚁、榕细长蚁、隆背细长蚁和无缘细长蚁），其余 3 个种（宾氏细长蚁、显赫细长蚁和尖唇细长蚁）为华南区特有种。从以上分析看出，中国细长蚁属物种在全球和中国动物地理区划中的生态位分化十分明显。

从水平分布来看，细长蚁属不同物种的进化潜力和扩散能力不尽相同。在 13 个物种之中，飘细长蚁分布于 12 个省份，表现出最好的扩散能力；平静细长蚁、狭唇细长蚁、榕细长蚁这 3 个种分布于 7~8 个省份，表现出良好的扩散能力；宾氏细长蚁和光亮细长蚁分布于 4~5 个省份，扩散能力较好；红黑细长蚁、叉唇细长蚁、无缘细长蚁、凹唇细长蚁、隆

背细长蚁这 5 个种分布于 2~3 个省份，扩散能力较差；而尖唇细长蚁和显赫细长蚁仅分布于 1 个省份，扩散能力最差。从水平分布看出，细长蚁属不同物种的生态位在水平维度上分化同样明显。此外，在发现细长蚁属物种分布的 12 个省份中，云南省的物种多达 12 个，远高于其他省份，与云南省地处横断山区并具有多样的地貌、气候和植被有关（徐正会，2002；徐正会等，2022）。与云南省相比，海南省仅发现 6 个物种，台湾省仅发现 3 个物种，岛屿隔离（Wallace, 1876）显著降低了海南岛和台湾岛的物种丰富度，隔离的距离与物种降低程度有关（Wegener, 2006）。可见地貌、气候、植被的多样化和地理隔离为细长蚁属物种生态位分化提供了地理和生态条件。

垂直分布很好的显示了不同物种的生态位分化情况（李文琼等，2017）。随着垂直分布高差由高降低，系统呈现出各个物种的生态位宽度。依据垂直分布海拔高差划分的物种生态适应幅度，将细长蚁属 13 个物种划分为较宽、中等、较窄、狭窄 4 类，其中狭唇细长蚁的垂直高差达到 1 665 m，是生态适应幅度最宽的物种；而显赫细长蚁仅在 770 m 的海拔高度上采获，表现出极高的稀有性。在各类物种之中，其具体的海拔区间又有差异，反映出不同物种生态位的深度分化。在垂直带上，不同的海拔区间栖息着不尽相同的蚂蚁物种（李文琼等，2016）。从海拔最高海拔 2 017 m 到最低海拔 43 m，细长蚁属的 13 个种分别适应了从温暖到炎热的气候类型，有利于降低亲缘关系相近物种间的竞争和共存。

栖息生境分析发现，常绿阔叶林、季节性雨林和山地雨林这 3 类生境中栖息着最多的细长蚁属物种；相反，干热河谷稀树灌丛、竹林、草丛这 3 类生境中栖息着最少的物种。原因是低纬度、低海拔条件优越的生境中植物种类丰富，能为蚂蚁提供更为复杂的食物资源、觅食场所和筑巢场所（McGlynn, 2006），而植被结构简单的生境可能导致树栖型蚂蚁物种的减少（Shik and Kaspari, 2010）。中国细长蚁属物种对生境的依赖程度差异极大，狭唇细长蚁和飘细长蚁可以栖息于 11 类生境中，占有很宽的生态位范围；相反，显赫细长蚁仅栖息于季节性雨林中，其生态位空间及其狭小。其余 10 个种的栖息生境类型不尽相同，即便栖息生境相同的不同物种，从采获频数看，其对不同生境的偏好不同。可见不同物种的生态位分化在栖息生境的选择上表现明显。

通过 MaxEnt 生态位模型对潜在影响细长蚁属分布的环境因子评估，结果表明温度（最干季平均温度、年温差、等温性和气温年较差）和降水（最干月降水量、最冷季降水量和降水量变异系数）是影响细长蚁属物种分布的主要环境因子。与蒋富国等（2023）、沈梦伟等（2016）、Guilherme *et al.*（2021）的研究结果相似。从细长蚁属物种适生区分布图来看，其适生区主要集中于秦岭-淮河以南的地区。秦岭-淮河作为气候分界线，是暖温带向亚热带过渡的重要地段（李双双等，2018），该界线以南地区适宜的温度、降水、植被等环境因子与起源种气候生态位相似，故物种多样性较高。

蚂蚁的功能多样性能影响不同蚂蚁物种的觅食和获取资源的能力（卢志兴等，2016）。已有研究显示，蚂蚁的身体大小、相对腿长及复眼相对大小能解释新大陆蚂蚁物种在生态和

形态空间上的差异,而且这些特征与蚂蚁的觅食行为相关(Kaspari and Weiser, 2000)。从觅食场所数据看出,细长蚁属不同物种的觅食场所类型差异明显,在不同场所中被捕获的频数差异显著。狭唇细长蚁的觅食场所类型最多,被捕获的频数最大;而显赫细长蚁仅在 1 类场所中被捕获 1 次。不同物种的种群大小不同,活动范围不同,觅食过程中对各类场所的偏好程度不同。可见细长蚁属不同物种在觅食行为方面亦表现出生态位的分化,利用物理和生态空间的能力不同,这与该属物种在个体大小、足长和复眼直径等功能特征等指标上存在差异有关。细长蚁属物种主要在树洞内筑巢,偶尔在朽木内和地表筑巢,因筑巢场所数据有限,未能很好反映物种生态位的分化现象,有待更深入的调查。

3.2 结论

依据过去 30 年里积累的我国细长蚁属物种的标本、生态和地理分布数据,研究了该属物种的区系和分布格局,合计发现中国细长蚁属物种 13 个。该属物种在全球动物地理区划中具有典型东洋界特征,在中国动物地理区划中具有典型华南区特征。分布格局研究显示,云南省细长蚁属的物种最丰富,飘细长蚁是生态适应幅度和生态位最宽的物种,而显赫细长蚁是生态适应幅度和生态位最窄的物种;常绿阔叶林和季节性雨林中栖息的物种最丰富;该属物种主要在植物上和地表觅食。依据区系和分布格局研究结果进一步探讨了物种的生态位分化现象,发现中国细长蚁属物种在全球和中国动物地理中、在水平和垂直维度上、在栖息生境的选择上、在觅食行为方面均表现出生态位的明显分化。生态位宽度研究表明,平静细长蚁的生态位最宽,显赫细长蚁和尖唇细长蚁生态位最窄。11 类生境中各物种的生态位宽度均偏大,表明细长蚁属物种在 11 类生境中群落较为稳定,适应能力较强。利用 MaxEnt 模型模拟物种在当前气候条件下的潜在分布范围,预测了细长蚁属在中国的适生区域。结论认为中国细长蚁属物种生态位分化明显,地貌、气候、植被的多样化和地理隔离为该属物种的生态位分化提供了良好生态和地理条件。

参考文献 (References)

- Anoop NR, Babu S, Nagarajan R, *et al.* Identifying suitable reintroduction sites for the White-rumped Vulture (*Gyps bengalensis*) in India's Western Ghats using niche models and habitat requirements [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106034.
- Darwin C. On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life [M]. London: John Murray, 1859.
- Guilherme DR, Pequeno PA, Baccaro FB, *et al.* Direct and indirect effects of geographic and environmental factors on ant beta diversity across Amazon basin [J]. *Oecologia*, 2021, 198 (1): 1-11.
- Hölldobler B, Wilson EO. The Ants [M]. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 1990.
- Jiang FG, Guo ZL, Wang YL, *et al.* Ant species diversity in agricultural areas in Southeastern China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (5): 1245-1251. [蒋富国, 郭宗林, 王亚璐, 等. 中国东南部农区蚂蚁物种多样性研究 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (5): 1245-1251]
- Kaspari M, Weiser MD. Ant activity along moisture gradients in a Neotropical forest [J]. *Biotropica*, 2000, 32 (4a): 703-711.
- Li SS, Lu JY, Yan JP, *et al.* Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73 (1): 13-24. [李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970—2015 年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义 [J]. 地理学报, 2018, 73 (1): 13-24]
- Li WQ, XU ZH, Zhou XY, *et al.* Ant species diversity of Mount Everest section of the Himalaya Mountains [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36 (1): 114-120. [李文琼, 徐正会, 周雪英, 等. 喜马拉雅山珠峰段的蚂蚁物种多样性 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36 (1): 114-120]

- Li WQ, XU ZH, Zhou XY, *et al.* Distribution patterns of ant species from Mount Everest Section of Mt. Himalaya [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (5): 1054-1062. [李文琼, 徐正会, 周雪英, 等. 喜马拉雅山珠峰段蚂蚁物种的分布格局 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (5): 1054-1062]
- Ma LB, Liu Q, Wang B, *et al.* Arboreal Ants of Yunnan: A Field Guide with High-resolution Photographs [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2022. [马丽滨, 柳青, 王波, 等. 云南树栖型蚂蚁高清图鉴 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2022]
- McGlynn TP. Ants on the move: Resource limitation of a litter-nesting ant community in Costa Rica [J]. *Biotropica*, 2006, 38: 419-427.
- Shen MW, Chen SB, Bi MJ, *et al.* Relationships between geographic patterns of ant species richness and environmental factors in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (23): 7732-7739. [沈梦伟, 陈圣宾, 毕孟杰, 等. 中国蚂蚁丰富度地理分布格局及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2016, 36 (23): 7732-7739]
- Shik JZ, Kaspari M. More food, less habitat: how necromass and leaf litter decomposition combine to regulate a litter ant community [J]. *Ecological Entomology*, 2010, 35 (2): 158-165.
- Smith F. Descriptions of some Hymenopterous insects captured in India, with notes on their economy, by Ezra T. Downes, Esq., who presented them to the Honourable the East India Company [J]. *Annals and Magazine of Natural History*, 1852, 9 (2): 44-50.
- Tang J, Li S, Huang EY, *et al.* Economic Insect Fauna of China. Fasc. 47. Hymenoptera, Formicidae (1) [M]. Beijing: Science Press, 1995. [唐觉, 李参, 黄恩友, 等. 中国经济昆虫志, 第四十七册, 膜翅目, 蚁科 (一) [M]. 北京: 科学出版社, 1995]
- Wallace AR. The Geographical Distribution of Animals (Vol.1) [M]. London: Macmillan, 1876.
- Wang W, Shen ZK, Zhao YH. A Taxonomic Study on the Family Formicidae from Hubei Province (Insecta: Hymenoptera: Formicidae) [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009. [王维, 沈作奎, 赵玉宏. 湖北省蚁科昆虫分类研究 (昆虫纲: 膜翅目: 蚁科) [M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 2009]
- Ward PS. Taxonomy, phylogeny and biogeography of the ant genus *Tetraponera* (Hymenoptera: Formicidae) in the Oriental and Australian regions [J]. *Invertebrate Taxonomy*, 2001, 15: 589-665.
- Wegener AL. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Translated by Li XD [M]. Beijing: Peking University Press, 2006. [Wegener AL. 海陆的起源. 李旭旦, 译 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2006]
- Wheeler WM. A list of the known Chinese ants [J]. *Peking Natural History Bulletin*, 1930, 5: 53-81.
- Wu J, Wang CL. A taxonomic study on the genus *Tetraponera* F. Smith (Hymenoptera: Formicidae) of China [J]. *Scientia Sinica*, 1990, 26 (6): 515-518. [吴坚, 王常禄. 中国细长蚁属 (膜翅目: 蚁科) 昆虫研究 [J]. 林业科学, 1990, 26 (6): 515-518]
- Wu J, Wang CL. The Ants of China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1995. [吴坚, 王常禄. 中国蚂蚁 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995]
- Wu ZW, Lu ZX, Chen YQ. Comparison of ant's functional traits in resource utilization [J]. *Forest Research*, 2015, 28 (5): 744-748. [武子文, 卢志兴, 陈又清. 蚂蚁利用资源的功能特征比较 [J]. 林业科学研究, 2015, 28 (5): 744-748]
- Xu ZH, Chai ZQ. Systematic study on the ant genus *Tetraponera* F. Smith (Hymenoptera: Formicidae) of China [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2004, 29 (1): 63-76.
- Xu ZH, Chu JJ, Zhang CL, *et al.* Ant species and distribution pattern in Gongbo Nature Reserve in southeastern Tibet [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2011, 30 (1): 118-123. [徐正会, 褚姣姣, 张成林, 等. 藏东南工布自然保护区的蚂蚁种类及分布格局 [J]. 四川动物, 2011, 30 (1): 118-123]
- Xu ZH, Jiang M, Yang GL, *et al.* Pictorial Book of Ants of Mt. Gaoligong [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2022. [徐正会, 姜明, 杨桂良, 等. 高黎贡山蚂蚁图鉴 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2022]
- Xu ZH, Zeng G, Liu TY, *et al.* A study on communities of Formicidae ants in different subtypes of vegetation in Xishuangbanna district of China [J]. *Zoological Research*, 1999, 20 (2): 118-125. [徐正会, 曾光, 柳太勇, 等. 西双版纳地区不同植被亚型蚁科昆虫群落研究 [J]. 动物学研究, 1999, 20 (2): 118-125]
- Xu ZH. A Study on the Biodiversity of Formicidae Ants of Xishuangbanna Nature Reserve [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002. [徐正会. 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002]
- Yu NN, Xu ZH, Zhang CL, *et al.* Distribution patterns of ant species from Mount Sejila, southeastern Tibet [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33 (5): 75-80. [于娜娜, 徐正会, 张成林, 等. 藏东南色季拉山蚂蚁物种的分布格局 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33 (5): 75-80]
- Zhang GM, Xie SC. Development of niche concept and its perspectives: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16 (6): 46-51. [张光明, 谢寿昌. 生态位概念演变与展望 [J]. 生态学杂志, 1997, 16 (6): 46-51]
- Zhang RZ. Zoogeography of China [M]. Beijing: Science Press, 2011. [张荣祖. 中国动物地理 [M]. 北京: 科学出版社, 2011]

Zhou SY. Ants of Guangxi [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2001. [周善义. 广西蚂蚁 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2001]